

WSEiZ W WARSZAWIE

WYDZIAŁ

LABORATORIUM FIZYCZNE

Ćw. nr 8

**BADANIE ŚWIATŁA SPOLARYZOWANEGO:
SPRAWDZANIE PRAWA MALUSA**

Warszawa 2009

1. Wstęp

Wiemy, że fale świetlne stanowią niewielki wycinek widma fal elektromagnetycznych obejmujący fale o częstościach od $4 \cdot 10^{14}$ Hz do $7.4 \cdot 10^{14}$ Hz. Częstościom tym odpowiadają fale elektromagnetyczne o długościach fal (w próżni) od $0.4 \mu\text{m}$ do $7.4 \mu\text{m}$. Fala elektromagnetyczna przedstawia rozchodzące się w przestrzeni periodyczne zmiany pola elektrycznego i magnetycznego. Zmiany natężenia pola elektrycznego $E(x,t)$ fali harmoniczej i płaskiej, rozchodzącej się wzdłuż osi x można opisać za pomocą funkcji sinus

$$\vec{E}(x,t) = E_0 \sin(\omega t - kx) \quad (1a)$$

gdzie:

E_0 - amplituda natężenia pola elektrycznego, ω —częstość kołowa, k - liczba falowa związana z długością fali λ zależnością: $k = 2\pi / \lambda$. Argument funkcji sinus: $\alpha(x, t) = \omega t - kx$ nazywamy fazą fali.

W przypadku fali rozchodzącej się w dowolnym kierunku wyznaczonym przez wektor k , wzór (1) przyjmuje postać:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = E_0 \sin\left(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}\right) \quad (1b)$$

gdzie $\vec{r} = [x, y, z]$ - wektor wodzący .

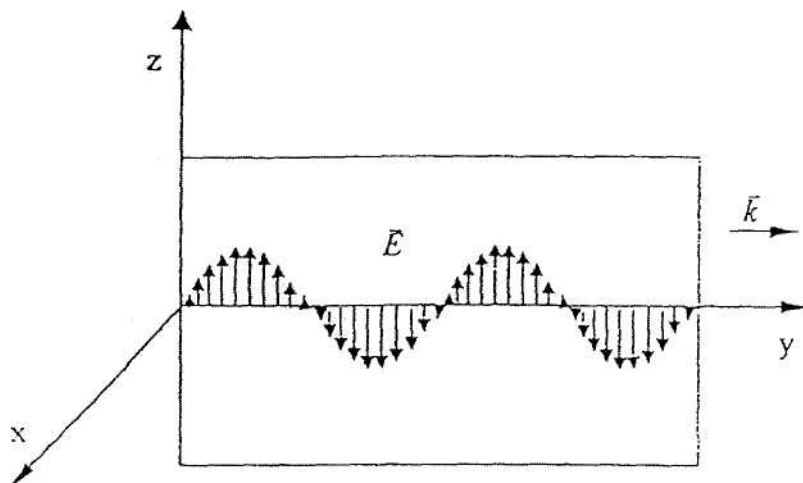
Analogiczne wyrażenie opisuje zmiany natężenia pola magnetycznego $H(x, y, z, t)$

rozważanej fali harmoniczej i płaskiej. Wektory \vec{E} , \vec{H} i \vec{K} są do siebie wzajemnie prostopadłe a zatem fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną, co oznacza, że wektor natężenia pola elektrycznego i natężenia pola magnetycznego drgają w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali. Za zjawiska optyczne występujące przy oddziaływaniu światła z materią odpowiedzialny jest głównie wektor natężenia pola

elektrycznego. Dlatego przyjęto drgania świetlne określać tylko wektorem \vec{E} i nazwano go wektorem świetlnym.

Zjawiskiem, w którym uwidacznia się poprzeczny charakter fal świetlnych jest *polaryzacja*. W fali świetlnej rozchodzącej się od Słońca lub innych źródeł jak np. rozżarzonych ciał, drgania wektora natężenia pola elektrycznego (wektora świetlnego) odbywają się prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali, lecz we wszystkich możliwych płaszczyznach przechodzących przez ten kierunek. Każde naturalne źródło składa się z olbrzymiej liczby elementarnych źródeł (promieniujących atomów), których kierunki drgań są rozmieszczone chaotycznie, co sprawia, że nie występuje żadna wyróżniona płaszczyzna dla kierunku drgań. Takie światło określa się jako *nie spolaryzowane*. Uporządkowanie kierunków drgań świetlnych uzyskać można, ogólnie mówiąc w wyniku oddziaływania światła z materią. Światło może być spolaryzowane *liniowo, kołowo lub eliptycznie*. Polaryzacja liniowa ma miejsce, gdy drgania wektora natężenia pola elektrycznego zachodzą tylko w jednej płaszczyźnie, która nie zmienia w czasie swej orientacji w przestrzeni (rys. 1). Inaczej

mówiąc płaszczyzna drgań wektora \vec{E} jest ta sama wzdłuż promienia. Gdy koniec wektora natężenia pola elektrycznego fali opisuje linię śrubową kołową lub eliptyczną mówimy o świetle spolaryzowanym kołowo lub eliptycznie.

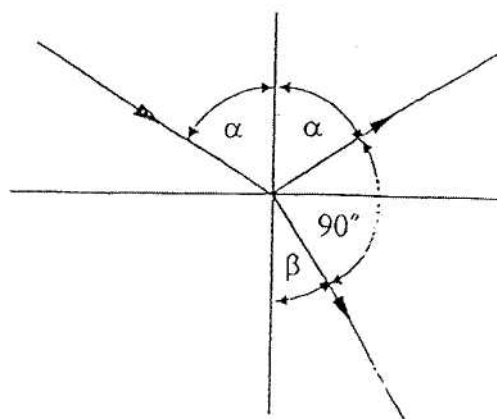


Rys.1 Fala spolaryzowana liniowo: wektor E drga w płaszczyźnie yz .

2 Metody uzyskiwania światła liniowo spolaryzowanego.

Światło spolaryzowane liniowo można otrzymać za pomocą polaryzatorów dwójłomnych, polaryzatorów odbiciowych oraz *polaroidów* czyli błon polaryzujących. Najczęściej stosowany polaroid można otrzymać ogrzewając a następnie szybko rozciągając przezroczystą błonę z alkoholu poliwinylowego. Podczas procesu wydłużania, większość długich cząsteczek polimeru, jakim jest alkohol poliwinylowy, rozmieszczonych początkowo zupełnie chaotycznie, obraca się i układa niemal wzdłuż tego samego kierunku, a mianowicie w kierunku siły wydłużającej. Następnie błonę zanurza się w roztworze bogatym w jod. Atomy jodu przenikają do warstwy ułożonej z alkoholu poliwinylowego. Dzięki temu atomy jodu układają się również w łańcuchy podobne do łańcuchowych cząsteczek polimeru. Prawie równoległe do siebie łańcuchy nasycone jodem, dzięki dobremu przewodnictwu jodu silnie pochłaniają drgania elektryczne zachodzące w kierunku do nich równoległym. Drgania w kierunku prostopadłym do łańcuchów cząsteczek zostają przepuszczone praktycznie bez strat energii.

Światło spolaryzowane można uzyskać również przez odbicie od dielektryka. Jednak wiązka odbita na ogół nie jest spolaryzowana całkowicie. Polaryzację całkowitą wiązki odbitej można uzyskać jedynie dla jednej wartości kąta padania. Kąt ten nosi nazwę kąta Brewstera.

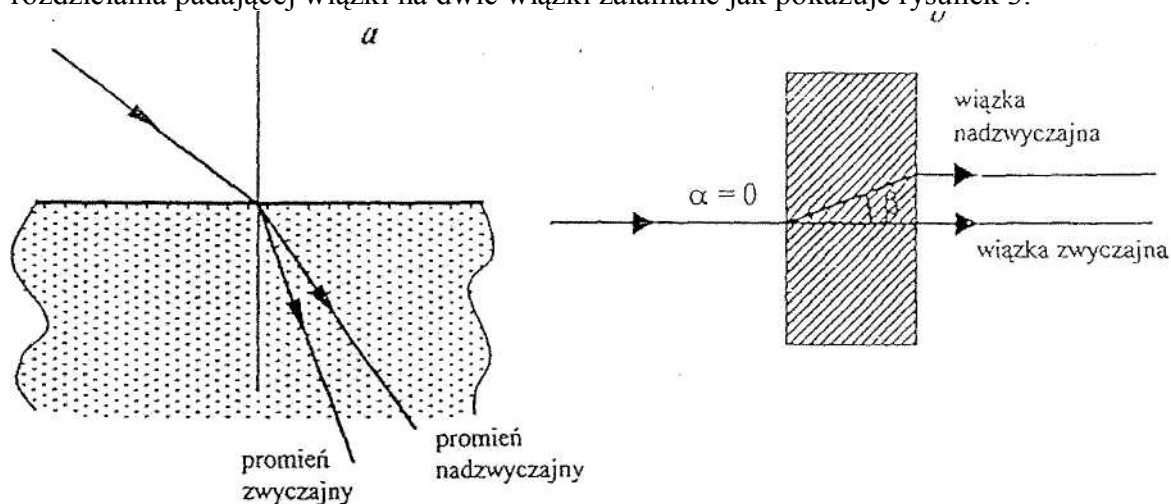


Rys.2 Całkowita polaryzacja światła podczas odbicia
 α -kąt padania, β - kąt załamania

Wiązka odbita zostaje spolaryzowana całkowicie, gdy jest prostopadła do wiązki załamanej. Kąt padania odpowiadający całkowitej polaryzacji określony jest więc równaniem:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90 - \alpha)} = \operatorname{tg} \alpha \quad (2)$$

Wiązka załamana spolaryzowana jest jedynie częściowo. Światło spolaryzowane można również uzyskać wykorzystując zjawisko podwójnego załamania, które ma miejsce w pewnej grupie kryształów zwanych kryształami dwójłomnymi. Kryształy dwójłomne mają własność rozdzielania padającej wiązki na dwie wiązki załamane jak pokazuje rysunek 3.



Rys.3 Podwójne załamanie wiązki w-kryształe dwójłomnym.

Własności wiązek załamanych są następujące

1. Obie wiązki mogą rozchodzić się w różnych kierunkach
2. Prędkość rozchodzenia obu wiązek są różne.
3. Każda wiązka jest całkowicie spolaryzowana liniowo.
4. Kierunki drgań wektora natężenia pola elektrycznego w obu wiązках są do siebie wzajemnie prostopadłe.

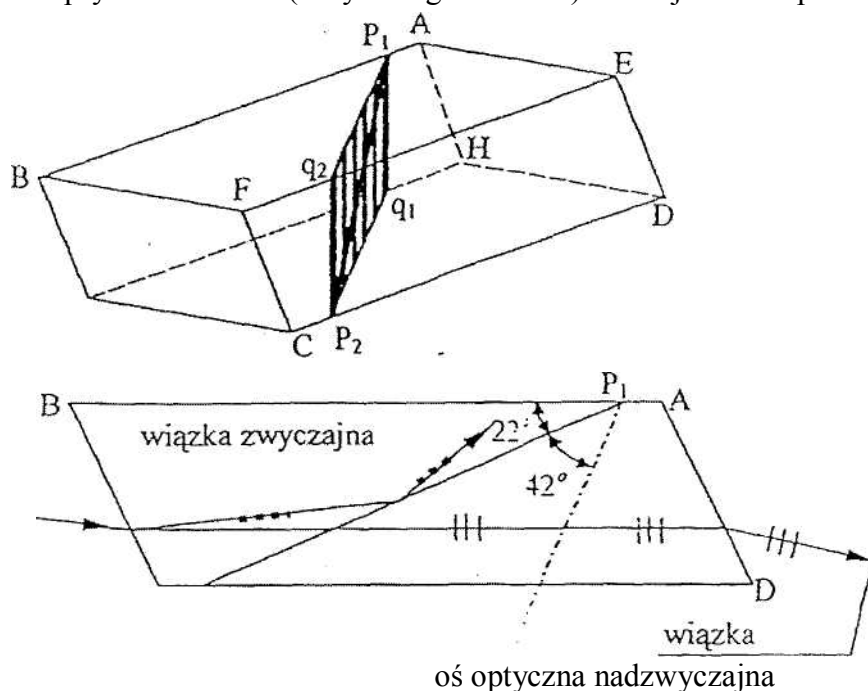
Jedną z fal ma zawsze stałą prędkość niezależną od tego w jakim kierunku rozchodzi się w kryształach. Wiązka ta ma zatem stały współczynnik załamania i spełnia prawo Snelliusa. Jest to tak zwana wiązka zwyczajna. Dla drugiej wiązki zwanej nadzwyczajną, prędkość fali jest różna i zależy od kierunku, w którym ta fala rozchodzi się w kryształach. Stosunek $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ dla

różnych kątów padania α nie ma dla fali nadzwyczajnej stałej wartości i traci on dla tej wiązki sens fizyczny. Świadczy o tym przykład przedstawiony na rys. 3b, gdy światło pada prostopadłe na powierzchnię kryształu. Dla wiązki nadzwyczajnej stosunek sinusów byłby w tym przypadku równy zero ($\alpha = 0$, β różne od zera);. Wobec tego współczynnikiem załamania fali nadzwyczajnej nazywamy stosunek prędkości fal; w próżni do prędkości fali nadzwyczajnej w kryształach. Prędkość wiązki nadzwyczajnej zależy od kąta, jaki tworzy wiązka światła z pewnym wyróżnionym kierunkiem zwanym osią optyczną kryształu. Jeśli w kryształach jest tylko jeden taki kierunek mówimy, że kryształ jest jednoosiowy. Gdy wiązka biegnie wzdłuż osi optycznej kryształu podwójne załamanie nie zachodzi, obie wiązki zwyczajna i nadzwyczajna rozchodzą się z jednakową prędkością.

W miarę wzrostu kąta pomiędzy kierunkiem wiązki nadzwyczajnej i kierunkiem osi optycznej rośnie różnica między prędkością wiązki nadzwyczajnej i prędkością wiązki zwyczajnej

przybierając wartość ekstremalną dla kierunku prostopadłego do osi optycznej. Problem otrzymania światła liniowo spolaryzowanego przy wykorzystaniu ciał dwójłomnych polega na znalezieniu metody usunięcia jednego z promieni załamanych. Zasłonięcie którejś z wiązek nie jest metodą skuteczną ze względu na to, że rozsuniecie promieni powstających przy dwójłomnym załamaniu jest nieduże. Dla rozdzielenia ich tą metodą należałoby stosować kryształy bardzo grube.

Jednym z najbardziej znanych polaryzatorów dwójłomnych jest polaryzator skonstruowany przez szkockiego fizyka Nicola. Naturalny kryształ kalcytu należy rozciąć wzdłuż płaszczyzny przekątnej w sposób przedstawiony na rys.4 a następnie skleić obie części za pomocą materiału mającego współczynnik załamania o wartości pośredniej między współczynnikami załamania dla wiązki zwyczajnej i nadzwyczajnej w kalcycie. Najlepszym materiałem do sklejania pryzmatów jest balsam kanadyjski. Otrzymany układ dzieli wiązkę padającą na dwie wiązki załamane i powoduje całkowite wewnętrzne odbicie wiązki zwyczajnej. Wiązka zwyczajna po całkowitym wewnętrznym odbiciu pada na wyczerzone boczne ścianki pryzmatu Nicola (nazywanego nikolem) i zostaje w nich pochłonięta.



Rys.4 Bieg wiązki światła w pryzmacie Nicola

Wiązka nadzwyczajna ulega tylko nieznacznemu osłabieniu przez odbicie, przechodzi przez warstwę balsamu kanadyjskiego i wychodzi z nikola równoległe do kierunku, w którym padła na nikol. W ten sposób z nikola wychodzi tylko wiązka nadzwyczajna, która jest liniowo spolaryzowana.

W fali liniowo spolaryzowanej można wektor \vec{E} na dwie składowe. Niech na kryształ pada liniowo spolaryzowana wiązka promieni o kierunku drgań wektora elektrycznego AA (rys 4) Płytkę jest tak wycięta, że kierunek jej osi optycznej nie pokrywa się z kierunkiem promienia.

W kryształach wektor \vec{E} nie ma pełnej swobody wykonywania drgań, lecz mogą odbywać się tylko w dwóch wyróżnionych kierunkach a mianowicie: 1) w kierunku równoległym do przecięcia głównego YY, 2) w kierunku do niego prostopadłym XX. Płaszczyzna przecięcia głównego jest wyznaczona przez kierunek promienia i kierunek osi optycznej. Ponieważ

kryształ (analyzer) narzuca spolaryzowanemu promieniowi dwa prostopadłe kierunki drgań, więc wektor elektryczny \vec{E} rozkłada się na dwa drgania składowe

$$\begin{aligned} E_x &= E \cos \alpha \\ E_y &= E \sin \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

Oba drgania składowe są spolaryzowane liniowo. Ponieważ strumień świetlny jest proporcjonalny do kwadratu amplitudy drgań wektora świetlnego, więc dla strumieni świetlnych odpowiadających drganiom składowym, otrzymujemy wyrażenia:

$$\begin{aligned} \Phi_x &= \Phi_0 \cos^2 \alpha \\ \Phi_y &= \Phi_0 \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie Φ_0 -strumień światła padającego na płytkę. Równania (4) wyrażają prawo Malusa.

3- Wykonanie ćwiczenia

Do ćwiczenia używamy zestawu pomiarowego składającego się z fotodiody z miernikiem fotoprądu oraz z dwóch płytek polaryzacyjnych w odpowiedniej oprawie z podziałką kątową. Na podstawie zależności (4) możemy zastąpić w prawie Malusa strumienie świetlne Φ odpowiadającymi im natężeniami prądu fotodiody.

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (5)$$

Po włączeniu źródła światła, obracamy polaryzator P wokół osi (kierunku wiązki światła) i znajdujemy taką pozycję przy której miliamperomierz wykaże maksymalną wartość natężenia prądu I_0 . Ma to miejsce wówczas, gdy kierunki płaszczyzn drgań obu płytek (polaryzatora P i analizatora A) pokrywają się. Następnie, polaryzator P obracamy o $5^\circ - 10''$ naokoło osi układu zmieniając w ten sposób kąt α , jaki tworzą płaszczyzny drgań polaryzatora i analizatora. Przy każdej "nowej pozycji odczytujemy natężenie prądu fotodetektora. Ostatni odczyt odpowiadać będzie kątowi $\alpha - 90^\circ$. Natężenie prądu w tym przypadku powinno być równe zero. Jednakże w praktyce nie uzyskuje się zerowej wartości, ze względu na to, że polaryzatory obok światła przepuszczanego w zasadniczym kierunku drgań przepuszczają w minimalnym stopniu składową drgań prostopadłych do tego kierunku. Wyniki pomiarów zapisujemy w tabelce, a następnie na ich podstawie sporządzamy wykres zależności prądu od $\cos^2 \alpha$ i-porównujemy ten wykres z wykresem funkcji

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2 \alpha \quad (6)$$

Pytania kontrolne.

1. Co to jest światło spolaryzowane liniowo, kołowo, eliptycznie?
2. Jakie są metody otrzymywania światła liniowo spolaryzowanego?

Literatura:

[1] S.Szczeniowski - Fizyka doświadczalna, cz. IV - Optyka, PWN, Warszawa (1963); [2]. David Halliday i Robert Resnick; Fizyka dla studentów nauk przyrodniczych i technicznych, t. II Warszawa PWN str.588 - 614 .